

XVI ERIAC
DECIMOSEXTO ENCUENTRO
REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ

17 al 21 de mayo de 2015



A1-23

Comité de Estudio A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas

DETECCIÓN DE FALLAS EN CUÑAS MAGNÉTICAS DE MOTORES DE INDUCCIÓN

G.R. BOSSIO*
GEA - UNRC
Argentina

C. VERUCCHI
INTELYMEC - UNICEN
Argentina

P.M. DE LA BARRERA
GEA - UNRC
Argentina

J.M. BOSSIO
GEA - UNRC
Argentina

R. LEIDHOLD
IESY – OVGU
Alemania

Resumen *– En motores eléctricos de gran potencia es común el empleo de ranuras abiertas con el fin de facilitar el ensamblado de las bobinas. Las ranuras abiertas introducen armónicos en la distribución de fuerza magnetomotriz sobre el entrehierro, lo que se traduce en pérdidas adicionales y torques parásitos. Con el fin de reducir estos efectos, se utilizan cuñas de material magnético. Estas cuñas suelen presentar desprendimientos parciales o totales, lo que a su vez puede derivar en otro tipo de fallas. En este trabajo se presenta una estrategia para la detección de fallas en cuñas magnéticas. Dicha estrategia consiste en la inyección de una señal de tensión de secuencia cero de alta frecuencia. Las corrientes resultantes son altamente dependientes de las no homogeneidades magnéticas tanto del rotor como del estator y por lo tanto sensibles a las asimetrías producidas por una falla en las cuñas. De esta manera es posible detectar y cuantificar una falla en las cuñas sin la necesidad de desarmar el MI ni de retirarlo de la línea de producción. La estrategia propuesta es aplicable fuera de línea para motores conectados directamente a la red. Se presentan resultados experimentales de laboratorio para validar la propuesta.*

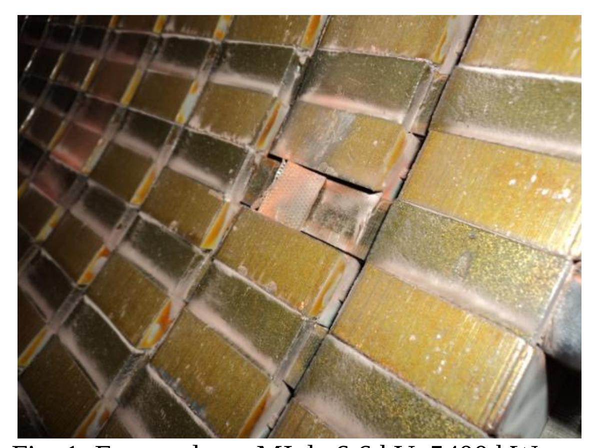
Palabras clave: Motor de Inducción – Cuñas Magnéticas – Diagnóstico de Fallas – Inyección de Señales.

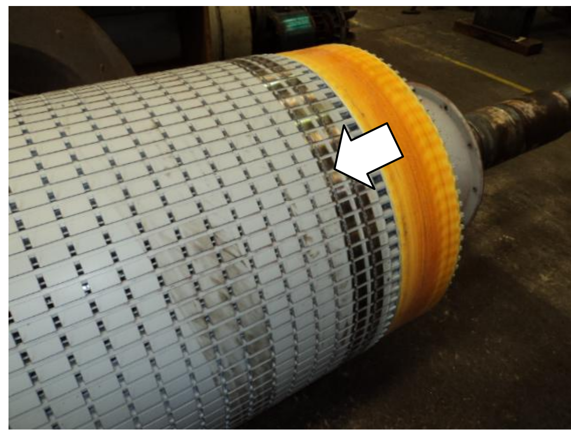
1 INTRODUCCIÓN

Los armónicos en la distribución espacial del flujo magnético sobre el entrehierro de un motor de inducción (MI) ocasionan oscilaciones de par y un incremento en las pérdidas adicionales. En máquinas de bajas potencias se utilizan ranuras semicerradas con el fin de mejorar la distribución espacial del flujo. En máquinas de gran potencia, en las que los bobinados se construyen con planchuelas, resulta imposible el uso de ranuras semicerradas y el problema de las oscilaciones de par se vuelve más importante. Una posible solución consiste en utilizar cuñas magnéticas en las ranuras del estator. Las cuñas magnéticas presentan permeabilidades relativas mayores a las de los materiales no magnéticos y reducen las diferencias en la reluctancia del entrehierro originadas por las ranuras [1]. Los beneficios del empleo de cuñas magnéticas no se limitan a la disminución de armónicos en la FMM del entrehierro sino que se extienden a la reducción de la corriente de vacío, de las pérdidas adicionales (asociadas a los flujos zig-zag) y de las pérdidas en el núcleo magnético [2][3]. Sin embargo, si se incrementa indiscriminadamente el valor de la permeabilidad relativa de las cuñas, o no se respetan ciertas condiciones en su geometría, pueden darse efectos negativos tales como una importante reducción del par de arranque y del par máximo del motor o un incremento en los flujos de dispersión [4].

* Ruta #36 km 601– (X5802BYA) Rio Cuarto, Córdoba. Argentina. e-mail: gbossio@ing.unrc.edu.ar

Trabajos más recientes [5]-[8], demuestran la posibilidad de reducir las corrientes de arranque y mejorar el par de arranque de MI mediante el empleo de este tipo de cuñas.
En lo que respecta a eficiencia energética, y en virtud de las nuevas clases de rendimiento a las que deben llegar los MI en el futuro inmediato, el empleo de cuñas magnéticas constituye una posibilidad concreta [9].
Además, las cuñas magnéticas evitan altas concentraciones de densidad de flujo en los dientes del estator y, por consiguiente, reducen las pérdidas magnéticas localizadas, como así también el incremento de temperatura dentro de la máquina [10].
Durante el arranque de un motor o ante cargas variables, las cuñas magnéticas se ven sometidas a esfuerzos cíclicos que pueden afectar las condiciones de sujeción dentro de las ranuras [11][12]. En efecto, los esfuerzos sobre las cuñas provocan desgaste y un desajuste de la presión sobre su alojamiento. Si este desgaste continúa es posible que se desprendan porciones importantes de cuñas que pueden dañar el rotor. A modo de ejemplo, en la Fig 1 se observa la rotura parcial de una cuña magnética en el estator de un MI. En la Fig. 2, asimismo, puede apreciarse el daño ocasionado sobre el rotor.
Las fallas en cuñas magnéticas pueden derivar en [13]: incremento de la corriente de vacío del motor, aumentos de temperatura, aumento de descargas parciales en las cabezas de bobinas en máquinas de media tensión e incremento del nivel de vibraciones del motor.
Durante las últimas décadas se han desarrollado innumerables técnicas de aplicación en línea para la detección temprana de fallas en máquinas eléctricas de inducción [14][15]. Estas técnicas permiten detectar fallas en los devanados del motor, en el circuito magnético, fallas mecánicas tales como excentricidades o fallas en rodamientos entre otras. En la literatura no abundan, sin embargo, técnicas para la detección de fallas en cuñas magnéticas.


Fig. 1. Estator de un MI de 6,6 kV, 5400 kW con fallas parciales en cuñas magnéticas.


Fig. 2. Daño sobre el rotor de un MI causado por desprendimiento de una cuña del estator.

Una de las primeras propuestas en tal sentido es el análisis del espectro de frecuencias de la corriente de estator. El deterioro de las cuñas magnéticas se manifiesta en este caso a través de un aumento en los armónicos de ranura [13]. Si bien los resultados experimentales muestran la eficacia de la técnica de diagnóstico, es importante destacar que sólo es viable en máquinas con deterioros muy significativos en sus cuñas.
Por otro lado, en [16] se presenta el caso de un MI de 5500 kW, con severos daños en las cuñas. El desgaste de las cuñas magnéticas provoca problemas de ajuste respecto a la ranura. Esto a su vez origina intersticios de aire en el sistema aislante de la máquina, lo cual aumenta el nivel de descargas parciales. De este modo se comprueba que por medio del seguimiento de descargas parciales es posible detectar fallas de esta naturaleza.
En [17][18] se propone una metodología original para la detección de fallas de cuñas magnéticas. El método es aplicable a motores accionados por inversores y requiere que la máquina esté fuera de servicio para su implementación. Dado que la falta total o parcial de una cuña modifica la característica magnética del motor, esta técnica propone aplicar pulsos de tensión sobre los devanados de estator y medir la respuesta transitoria con el fin de estimar la inductancia del circuito magnético. El inversor permite programar los pulsos de tensión sobre cada fase de modo tal de direccionar la excitación magnética. Posteriormente, haciendo rotar dicha excitación y estimando las inductancias para cada punto de la circunferencia del entrehierro, es posible

identificar, mediante comparación, una situación irregular que podría deberse a la falla que se pretende diagnosticar.
Finalmente, en [19] se propone un método alternativo que ofrece resultados alentadores. Éste consiste en sacar de servicio al motor y alimentarlo con un inversor de baja potencia que permita obtener la respuesta de corriente ante una excitación de baja tensión. Midiendo la tensión aplicada y la corriente que toma el motor para distintos ángulos de aplicación, es posible obtener la impedancia equivalente del motor en función del ángulo del entrehierro. Cuñas defectuosas originan cambios en la reactancia equivalente, tanto en la parte activa como reactiva, y permiten identificar una anormalidad.
En este trabajo se propone una técnica de detección de fallas en cuñas magnéticas mediante la inyección de una señal de tensión de secuencia cero de alta frecuencia. Dado que las corrientes resultantes dependen de las no homogeneidades magnéticas, éstas serán sensibles ante una asimetría producida por la falla. De esta manera, se analizan las derivadas de las corrientes obtenidas de manera sincronizada con la conmutación. Adecuadamente filtradas y transformadas a un referencial estacionario α–β, éstas derivadas permiten determinar tanto la severidad de la falla, como así también su ubicación dentro del estator.

2 ESTRATEGIA PROPUESTA

La estrategia propuesta para la detección de fallas en las cuñas magnéticas consiste en el análisis de las derivadas de las corrientes cuando se inyecta una tensión de secuencia cero de alta frecuencia a los bobinados del motor. Las señales de alta frecuencia han sido utilizadas previamente para el análisis de no homogeneidades en motores tanto de inducción como de imanes permanentes alimentados mediante variadores de velocidad [20]-[24]. Es posible demostrar que las corrientes y sus derivadas, producidas por la señal de tensión inyectada, dependen de las inductancias del MI. Las no homogeneidades magnéticas del motor, dadas por las características constructivas o generadas por una falla, modifican las inductancias y por tal motivo es posible analizarlas mediante la estrategia propuesta.
En esta sección se presenta un método de inyección de señales de secuencia cero para el diagnóstico de fallas de manera off-line, es decir con el motor fuera de funcionamiento.

2.1 Método de Inyección de Señales fuera de Línea

Para evaluar las asimetrías a partir de la inyección de señales de secuencia cero en MI, se implementó el circuito simplificado que se muestra en la Fig. 3. El mismo está compuesto por una sola pierna de llaves electrónicas de potencia. Las tres fases del MI están en paralelo conectadas entre el centro de la pierna y el punto medio de la malla de corriente continua cuya tensión es U_d. De esta manera es posible inyectar una señal de secuencia cero con media nula encendiendo alternadamente las llaves S_1 y S_2. Estos estados se denominarán u_1 y u_2 respectivamente.

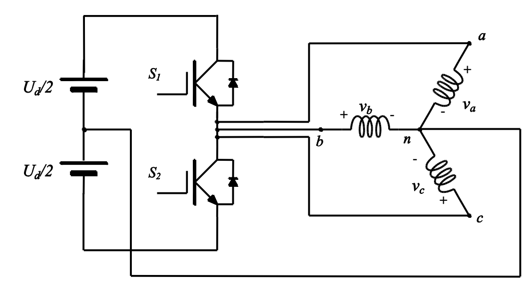


Fig. 3. Circuito para evaluar la inyección de tensión de secuencia cero.

La derivada de la corriente en cada una de las fases para la señal de secuencia cero dependerá tanto de la FEM inducida como así también de las caídas resistivas y de las inductancias propias y mutuas de las fases. Para evaluar esta señal se propone en primer lugar un análisis simplificado de cada una de las fases donde no se asume acoplamiento con las fases restantes ni con los circuitos del rotor. En ese caso los circuitos equivalentes para los estados de las llaves u_1 y u_2, se muestran en la Fig. 4.

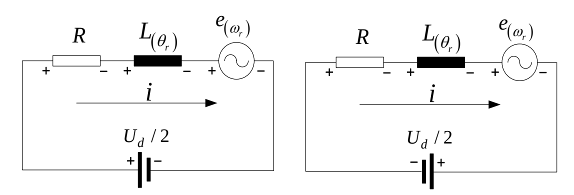


Fig. 4. Circuitos simplificados correspondientes a una fase del MI para los dos estados de las llaves.

La tensión a los bornes de la inductancia en estos dos casos está dada por:

$$L(\theta_r)\frac{di}{dt} = -Ri - e(\omega_r) + \frac{U_d}{2}, \quad (1)$$

$$L(\theta_r)\frac{di}{dt} = -Ri - e(\omega_r) - \frac{U_d}{2}, \quad (2)$$

Asumiendo que entre un estado y el otro de las llaves tanto la corriente, la FEM y la posición no varían significativamente la diferencia entre las derivadas de la corriente para cada uno de los dos estados resulta en

$$x(\theta_r) = \frac{di}{dt}^{u1} - \frac{di}{dt}^{u2} = \frac{U_d}{L(\theta_r)}, \quad (3)$$

donde se puede observar que la señal obtenida depende de la tensión de la malla de corriente continua como así también de la inductancia. Por tal motivo si la inductancia se ve modificada por las no homogeneidades magnéticas del rotor y del estator también lo será la función $x(\theta_r)$. Realizando la operación anterior sobre las derivadas de las corrientes para cada una de las fases es posible obtener una terna trifásica de señales que depende de estas no homogeneidades o irregularidades del MI. Como se verá posteriormente, en los MI sin falla es común que estas señales varíen periódicamente por el efecto de las ranuras del rotor. La cantidad de ciclos por revolución de estas señales es función del número de barras del rotor.

De acuerdo a este resultado la estrategia para generar la señal de detección de fallas se presenta en la Fig. 5. A partir de las corrientes de fase se calculan las derivadas de corrientes. Estas derivadas de corriente son muestreadas de manera sincronizada con los estados u_1 y u_2. Mediante la resta de las derivadas de corriente entre estos dos estados se cancelan los términos dependientes de la FEM y las caídas resistivas como se demostró anteriormente. Luego, debido a la diferencia de signo entre las derivadas de la corriente para los dos estados nulos es necesario demodular la señal. A la señal demodulada se le aplica un filtro pasa bajos para eliminar las componentes de alta frecuencia. Finalmente, las señales trifásicas se transforman a un referencial $\alpha-\beta$ para extraer la información asociada a las no homogeneidades del motor.

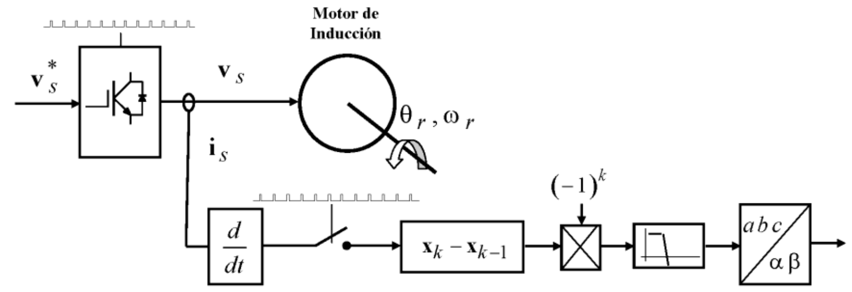


Fig. 5. Estrategia de diagnóstico de fallas.

3 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Para validar la propuesta, se implementó el circuito mostrado en la Fig. 3 en el que se observa una pierna de IGBTs (marca IXYS iso-smart vie 100-12 s 434A) conectada a un MI. En esa condición, se inyectó la señal de tensión descripta en la Sección 2.1, la frecuencia de esta señal se ajustó en 1kHz. La señal de corriente se midió a través de una pinza de efecto Hall y fue capturada mediante un registrador (marca YOKOGAWA Modelo OR300) con una frecuencia de muestreo de 16kS/s.

A partir de la medición de las corrientes de fase del MI, se obtuvieron las variaciones de corriente respecto del tiempo (di_x/dt). Si bien este cálculo es sensible al ruido en la medición, el proceso de cálculo se realizó de manera sincronizada entre dos conmutaciones, alrededor del cruce por cero de la corriente. De esta manera la derivada es más estable y menos susceptible al ruido de medición [25]-[27].

En la figura 6 se observa una fotografía del estator del MI ensayado, con cuñas magnéticas. Tanto la cuña magnética, como una cuña de madera empleadas comúnmente en estos motores, se observan en la figura 7.

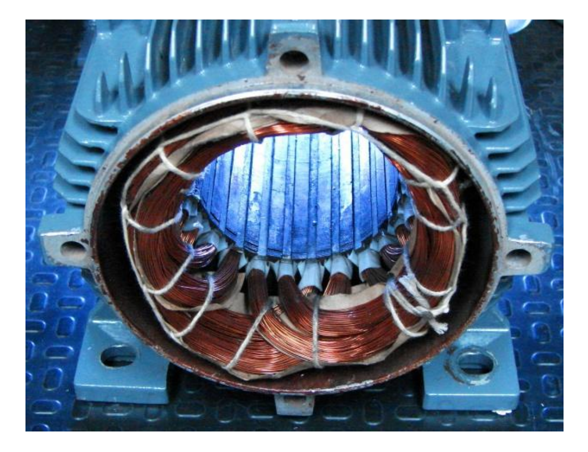
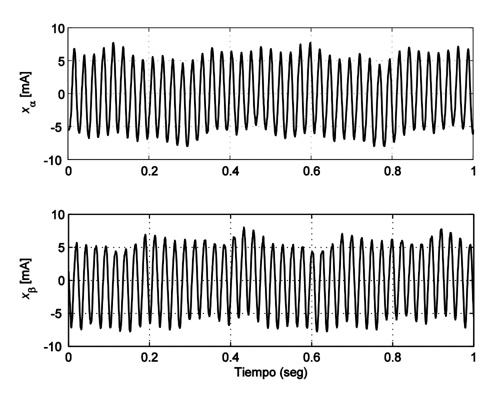


Fig. 6. Estator del MI con cuñas magnéticas.



Fig. 7. Cuña de madera y cuña magnética.

Para evaluar el efecto de la pérdida de cuñas magnéticas se ensayó el motor sano y luego se repitió el ensayo quitando distinta cantidad de cuñas. La tensión de la malla de corriente continua (U_d) utilizada para estos ensayos es de 32 V. El rotor se hizo girar mediante una máquina de potencia fraccionaria manteniéndose la velocidad en todos los casos a 120 rpm. Las Figs. 8, 10 y 12 muestran los resultados obtenidos para el motor sano. La Fig. 8 muestra las señales x_α y x_β en función del tiempo. Se observa que estas señales se encuentran prácticamente en cuadratura y tienen una componente de 20 ciclos/rev. coincidente con el número de barras del rotor. La traza de estas señales en el plano α–β se muestra en la Fig. 10. Esta traza, prácticamente circular, posee 20 ciclos por revolución del rotor. En el espectro en frecuencia de redes de secuencia (Fig. 12) se observa claramente esta componente de 20 ciclos/rev. y otras componentes de menor amplitud a 1, 2 y 4 ciclos/rev. originadas por asimetrías constructivas del motor tales como la excentricidad estática y/o dinámica del entrehierro. Las Figs. 9, 11 y 13 muestran los resultados quitando una cuña magnética. Se observa que la principal diferencia en las señales de diagnóstico es la componente de continua que aparece en las señales α–β. Esta componente desplaza la traza de la señal en el plano α–β y se observa como una componente de continua en el espectro en frecuencia.



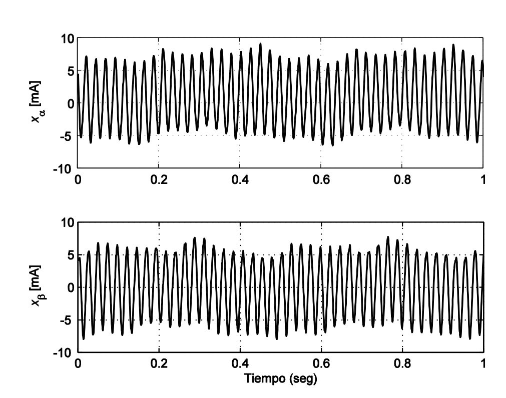
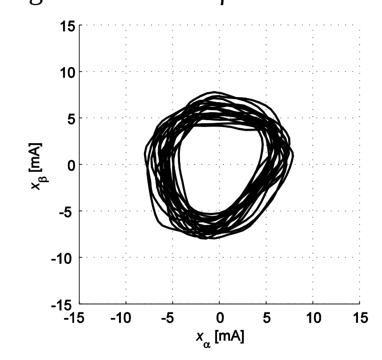


Fig. 8. Señales α–β. Motor sano.

Fig. 9. Señales α–β. Motor sin una cuña.



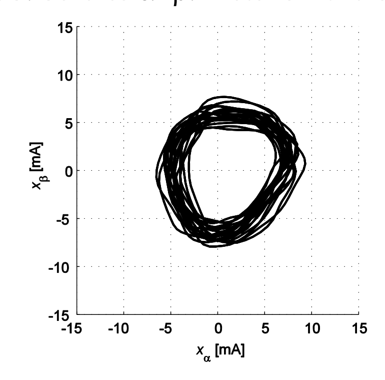


Fig. 10. Traza de la señal de diagnóstico en el plano α–β. Motor sano.

Fig. 11. Traza de la señal de diagnóstico en el plano α–β. Motor sin una cuña.

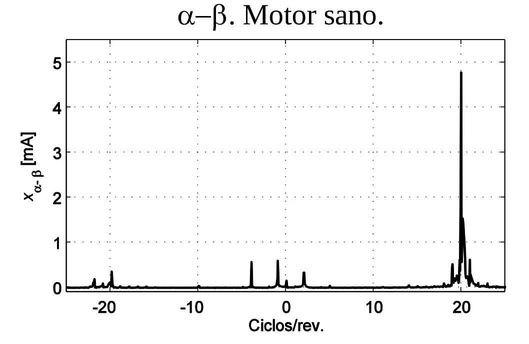


Fig. 12. FFT vectorial de la señal de diagnóstico. Motor sano.

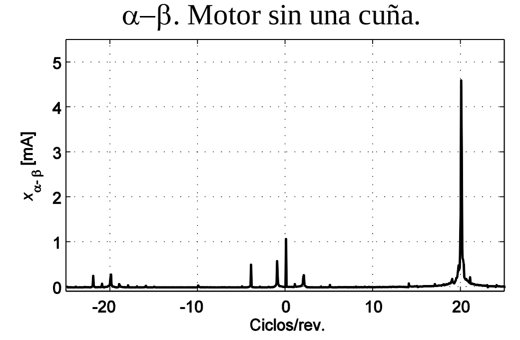


Fig. 13. FFT vectorial de la señal de diagnóstico. Motor sin una cuña.

En la Fig. 14 se puede observar el valor medio de las señales en el plano α–β para el motor sano y con distintos niveles de severidad de la falla. En total se realizaron 18 ensayos repitiéndose tres veces para cada condición del motor. En el centro de la traza se pueden observar los ensayos correspondientes al motor sano, luego se observan los resultados correspondientes a la extracción de una, dos y tres cuñas consecutivas en la dirección de la fase A. También se muestran en la misma figura los valores medios de las señales de diagnóstico para el motor sin una cuña en la dirección de las fases B y C respectivamente. La dirección del desplazamiento en el plano α–β indica la ubicación de la cuña fallada dentro del estator.

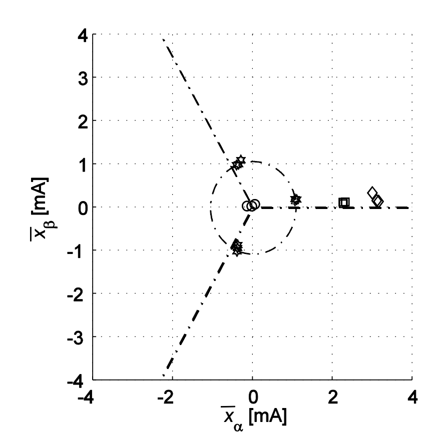


Fig. 14. Valor medio de las señales en el plano α–β para el motor sano (☆), sin una cuña (○), sin dos cuñas (□), y sin tres cuñas (◊).

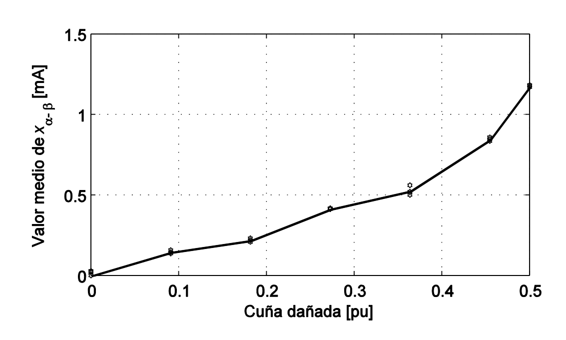


Fig. 15. Desplazamiento del valor medio de la señal en función del porcentaje de cuña eliminada.

Posteriormente, para evaluar la sensibilidad del método propuesto se quitaron en una ranura del estator distintas porciones de una cuña. En la Fig. 15 se puede observar el desplazamiento del valor medio de la señal en el plano α–β en función del porcentaje de cuña eliminada. Para cada estado de falla se realizaron tres ensayos. La curva continua muestra el valor medio obtenido de los tres ensayos y se encuentran además marcados los puntos correspondientes a cada uno de los ensayos. Los estados mostrados corresponden al motor sin falla y a la eliminación de 10, 20, 30, 40, 50 y 55 mm de una cuña. En total se muestran los resultados de 21 ensayos. Se puede observar que la señal propuesta para la detección de la falla se incrementa conforme aumenta la severidad de la misma. Por otra parte, existe una muy baja dispersión entre los resultados obtenidos para cada condición pudiendo diferenciar claramente entre estos.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se propuso una estrategia para la detección de fallas en las cuñas magnéticas de los MI. Para ello se utilizó la inyección de una señal de tensión de secuencia cero de alta frecuencia. Las corrientes resultantes dependen de las no homogeneidades magnéticas tanto del rotor como del estator y por lo tanto

son sensibles a las asimetrías producidas por una falla en las cuñas. A partir de las corrientes se analizaron las derivadas de las mismas de manera sincronizada con la conmutación. Estas derivadas, adecuadamente filtradas y transformadas a un referencial estacionario $\alpha-\beta$, permiten determinar tanto la severidad de la falla como así también su ubicación. La asimetría producida por la falla de las cuñas del estator produce un desplazamiento de la traza de las señales en el plano $\alpha-\beta$ cuya amplitud depende de la severidad de la falla y su dirección de la ubicación geométrica de la falla dentro del estator.
Los resultados experimentales con asimetrías en la distribución de las cuñas del estator mostraron una alta sensibilidad de la estrategia propuesta para la detección de fallas incipientes.

5 REFERENCIAS

[1] Anazawa, Y.; Kaga, A.; Akagami, H.; Watabe, S.; Makino, M., “Prevention of harmonic torques in squirrel cage induction motors by means of soft ferrite magnetic wedges”. IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 18, nº 6, pp. 1550 – 1552, 1982.

[2] Y. Takeda, T. Yagisawa, A. Suyama, and M. Yamamoto, "Application of magnetic wedges to large motors". IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 20, nº 5, pp. 1780-1782, 1984.

[3] H. Mikami, K. I de, K.Arai, M. Takahashi and K. Kajiwara, "Dynamic harmonic field analysis of a cage type induction motor when magnetic slot wedges are applied". IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 12, nº 4, pp. 337-343, 1997.

[4] G. Madescu, M. Greconici, M. Biriescu, and M. Mot, "Effects of stator slot magnetic wedges on the induction motor performances", in 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), pp. 489-492, 2012.

[5] J. Kappatou, C. Gyftakis, and A. Safacas, "A study of the effects of the stator slots wedges material on the behavior of an induction machine". 18th International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp.1-6, 2008.

[6] Gyftakis, K.N.; Panagiotou, P.A. and Kappatou, J. “The influence of semi-magnetic wedges on the electromagnetic variables and the harmonic content in induction motors”. XXth International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 1469 – 1474, 2012.

[7] Skalka, M.; Ondrusek, C.; Kurfurst, J.; Cipin, R., “Harmonic reduction in induction machine using slot wedges optimization”. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), pp. 1252 – 1255, 2012.

[8] Shuping Wang, Zhengming Zhao, Liqiang Yuan and Buyao Wang, “Investigation and analysis of the influence of magnetic wedges on high voltage motors performance”. Vehicle Power and Propulsion Conference. VPPC '08. IEEE, pp. 1 - 6, 2008.

[9] R. Curiac and H. Li, "Improvements in energy efficiency of induction motors by the use of magnetic wedges", in Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC), Record of Conference Papers Industry Applications Society 58th Annual IEEE, pp. 1-6, 2011.

[10] T. Gaerke and D. Hernandez , "The Temperature Impact of Magnetic Wedges on TEFC Induction Motors". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 49, nº 3, pp. 1228-1233, 2013.

[11] R. Hanna and D. W. Schmitt, "Failure Analysis of Induction Motors: Magnetic Wedges in Compression Stations". Industry Applications Magazine, IEEE, Vol. 18, nº 4, pp. 40-46, 2012.

[12] R. A. Hanna, W. Hiscock, and P. Klinowski, "Failure Analysis of Three Slow-Speed Induction Motors for Reciprocating Load Application". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 43, nº 2, pp. 429-435, 2007.

[13] Mike Davis, “Problems and Solutions with Magnetic Stator Wedges”, Iris Rotating Machines Conference. June 2007, San Antonio, TX.

[14] C. Verucchi and G. Acosta, "Fault Detection and Diagnosis Techniques in Induction Electrical Machines," Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina) , vol.5, no.1, pp.41,49, March 2007.

[15] H. Henao, G.-A. Capolino, M. Fernandez-Cabanas, F. Filippetti, C. Bruzzese, E. Strangas, R. Pusca, J. Estima, M. Riera-Guasp, and S. Hedayati-Kia, “Trends in fault diagnosis for electrical machines: A review of diagnostic techniques,” IEEE Ind. Electron. Mag., vol. 8, no. 2, pp. 31–42, Jun. 2014.

[16] S. Cary, J. Hanson, C. Evans, and I. Blokhintsev, "Electric rotating machine standards part II: Magnetic wedge design and monitoring methods", in Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC), Record of Conference Papers Industry Applications Society 58th Annual IEEE, pp. 1-8, 2011.

[17] G. Stojicic, M. Samonig, P. Nussbaumer, G. Joksimovic, M. Vasak, N. Peric, and T. M. Wolbank, "A method to detect missing magnetic slot wedges in AC machines without disassembling", in IECON 2011-37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1698-1703, 2011.
[18] G. Stojcic, R. Magnet, G. Joksimovic, M. Vasak, N. Peric, and T. M. Wolbank, "Detecting partially fallen-out magnetic slot wedges in AC machines based on electrical quantities only", in IECON 2012- 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 3887-3892, 2012.
[19] Kun Wang Lee, Jongman Hong, Doosoo Hyun, Sang Bin Lee, Wiedenbrug E., Teska M., Chaewoong Lim, "Detection of Stator Slot Magnetic Wedge Failures for Induction Motors without Disassembly". 9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines Power Electronics and Drives (SDEMPED), pp. 183 – 191, 2013.
[20] Leidhold, R. "Position sensorless control of PM synchronous motors based on zero-sequence carrier injection". IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, nº 12, pp. 5371-5379, 2011.
[21] P. M. de la Barrera, G. R. Bossio, and J. A. Solsona, "High–Resistance Connection Detection in Induction Motor Drives using Signal Injection" IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 7, pp. 3563–3573, July 2014.
[22] Bossio G., C. De Angelo, J. Solsona, G. García, and M. I. Valla, "Application of an Additional Excitation in Inverter-Fed Induction Motors for Air-Gap Eccentricity Diagnosis," IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 21, No. 4, Dec. 2006, pp. 839-847.
[23] P. M. de la Barrera, G. R. Bossio, and C. H. De Angelo, "Stator Winding Fault Detection Using High Frequency Signal Injection for Induction Motors with Closed Rotor Slots," 8th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, SafeProcess 2012, Sep. 2012, DF, México.
[24] Pablo M. de la Barrera and Guillermo R. Bossio, "Stator Core Faults Detection on Induction Motor Drives Using Signal Injection", The 8th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2011), Bologna, Italy, Sep. 5-8, 2011.
[25] Vogelsberger, M. A., S. Grubic, T. G. Habetler, and T. M. Wolbank, (2010) "Using PWM-induced transient excitation and advanced signal processing for zero-speed sensorless control of ac machines". IEEE on Transaction Industrial Electronics, Vol. 57, nº 1, pp. 365–374, 2010.
[26] Wolbank, T. M., J. L. Machl, and H. Hauser "Closed-loop compensating sensors versus new current derivative sensors for shaft-sensorless control of inverter fed induction machines". IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 53, nº 4, pp. 1311-1315, 2004.
[27] Holtz, J. and J. Juliet. "Sensorless acquisition of the rotor position angle of induction motors with arbitrary stator windings". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, nº 6, pp. 1675-1682, 2005.

APÉNDICE 1

PARÁMETROS Y DATOS CARACTERÍSTICOS DEL MI

Los parámetros y datos característicos del MI empleado para la validación experimental con asimetrías en las cuñas del estator se muestran en la Tabla I.

TABLA I. PARÁMETROS Y DATOS CARACTERÍSTICOS DEL MI CON CUÑAS EN EL ESTATOR.

Variable	**Valor**	**Variable**	**Valor**	**Variable**	**Valor**
Pn (kW)	3	f (Hz)	50	Pares de polos	1
Vn (V)	230/400	ωn (r.p.m.)	2890	Ranuras de estator	24
In (A)	10.6/6.1	cos φ	0.85	Barras del rotor	20